第二章　单相变压器

2-1

解：高压侧：

$$I_1 = \frac{S_N}{\sqrt{3}u_1} = \frac{500 * 10^3}{\sqrt{3} * 35000} = 8.25\ A$$

低压侧：

$$I_2 == \frac{S_N}{\sqrt{3}u_2} = \frac{500 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 721.7\ A$$

2-2

（1）一次侧两个绕组串联，二次侧两个绕组串联，变比 k=10，一次侧额定电流 $\mathbf{I_{1N} = 4.545A}$，二次侧额定电流$\mathbf{I_{2N} = 45.45A}$。

（2）一次侧两绕组串联，二次侧两绕组并联，变比 k=20，$\mathbf{I_{1N} = 4.545A}$，$\mathbf{I_{2N} = 90.9A}$。

（3）一次侧两绕组并联，二次侧两绕组串联，变比 k=5，$\mathbf{I_{1N} = 9.09A}$，$\mathbf{I_{2N} = 45.45A}$。

（4）一次侧两绕组并联，二次侧两绕组并联，变比 k=10，$\mathbf{I_{1N} = 9.09A}$, $\mathbf{I_{2N} = 90.9A}$。

p42:2-3 设有一台 500kVA、50Hz、三相变压器、Dyn 连接（上列符号的意义为一次绕组接成三角形，二次绕组接成星形并有中线引出），额定电压为 10000/400V（上列数字的意义为一次额定线电压 10000V，二次额定线电压为 400V，以后不加说明，额定电压均指线电压）；

（1） 试求一次额定线电流及相电流，二次额定线电流；

（2） 如一次每相绕组的线圈有 960 匝，问二次每相绕组的线圈有几匝？每匝的感应电动势为多少？

（3） 如铁芯中磁通密度的最大值为 1.4T，求该变压器铁芯的截面积；

（4） 如在额定运行情况下绕组的电流密度为 $3A/\mathrm{mm}^2$，求一、二次绕组各应有的导线截面。

解：(1) 一次绕组三角形连接，线电压等于相电压 $U_{1N1} = U_{1N\psi} = 10000\,\mathbf{V}$

额定线电流 $I_{1N1} = \dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \dfrac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times10000} = 28.87(A)$

额定相电流 $I_{1N\psi} = \dfrac{I_{1N1}}{\sqrt{3}} = \dfrac{28.87}{\sqrt{3}} = 16.67(A)$

二次绕组 Y 连接，额定线电流等于额定相电流

$$I_{2N1} = I_{2N\psi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times400} = 721.71(A)$$

（2） 二次相电压 $U_{2N\psi}=\frac{U_{2N}}{\sqrt{3}}=\frac{400}{\sqrt{3}}\approx 231$

$$K=\frac{N_1}{N_2}=\frac{U_{1N\psi}}{U_{2N\psi}}$$ 所以

$$N_2=\frac{N_{2N\psi}\times N_1}{N_{1N\psi}}=\frac{231\times 960}{10000}\approx 22(\text{匝})$$

每匝的感应电动势 $e=\frac{U_{2N\psi}}{N_2}=\frac{231}{22}=10.5$ （V）

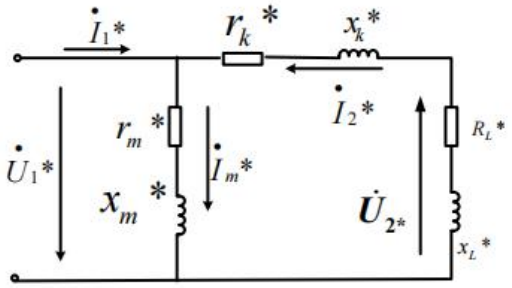
(3) $U_{1N}=4.44fN_1\Phi_m$ $\Phi_m=B_mS$

所以截面积 $S=\frac{U_{1N}}{4.44fN_1B_m}=\frac{10000}{4.44\times 50\times 960\times 1.4}=3.35\times 10^{-2}(\text{m}^2)$

一次绕组导线截面积 $S_1=\frac{I_{1N\psi}}{\rho}=\frac{16.67}{3}=5.557\times 10^{-6}(\text{m}^2)$

二次绕组导线截面积 $S_2=\frac{I_{2N\psi}}{\rho}=\frac{721.71}{3}=2.406\times 10^{-4}(\text{m}^2)$

2-4



解：（1） 短路电抗 $x_k=\sqrt{z_k^2-r_k^2}=\sqrt{30^2-8^2}\approx 29(\Omega)$

高压侧阻抗基值 $Z_{1b}=\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{1100^2}{2\times 10^3}=605(\Omega)$

低压侧阻抗基值 $Z_{2b}=\frac{U_{2N}^2}{S_N}=\frac{110^2}{2\times 10^3}=6.05(\Omega)$

短路电阻标幺值 $r_{k*}=\frac{r_k}{Z_{1b}}=\frac{8}{605}=0.0132$

短路电抗标幺值 $x_{k*}=\frac{x_k}{Z_{1b}}=\frac{29}{605}=0.0479$

$$Z_m = r_m + jx_m = \frac{\dot{U}_{1N}}{\dot{I}_0} = \frac{1100}{0.01 - j0.09} = 1342 + j12080\Omega$$

$$r_m^* = \frac{r_m}{Z_{1b}} = \frac{1342}{605} = 2.22$$

$$x_{m^*} = \frac{x_m}{Z_{1b}} = \frac{12080}{605} = 19.96 \approx 20.0$$

负载电阻标幺值 $R_{L*} = \frac{R_L}{Z_{2b}} = \frac{10}{6.05} = 1.653$

负载感抗标幺值 $X_{L*} = \frac{X_L}{Z_{2b}} = \frac{5}{6.05} = 0.8264$

（2） 设二次电压 $\dot{U}_{2*} = 1\angle 0^0$ 所以

$$\dot{I}_{2*} = \frac{\dot{U}_{2*}}{R_{L*} + jX_{L*}} = \frac{1\angle 0^0}{1.653 + j0.8264} = 0.5411\angle -26.56^0$$

$$\dot{U}_{1*} = -\dot{I}_{2*}(Z_{k*} + Z_{L*}) = -0.5411\angle -26.56^0 \times (0.0132 + j0.0478) + 1\angle 0^0 = -1.0181\angle 1.12^0$$

$$\dot{I}_{1*} = \dot{I}_{m*} - \dot{I}_{2*} = \frac{\dot{U}_{1*}}{Z_{m*}} - \dot{I}_{2*} = \frac{-1.0181\angle 1.12^0}{2.22 + j19.96} - 0.5411\angle -26.56^0 = 0.571\angle 149.2^0$$

所以 $U_{1*} = 1.0181$ $I_{1*} = 0.571$

或（2）设$-\dot{U}_2^* = 1\angle 0°$

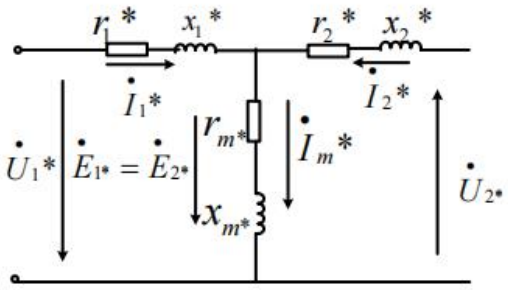
$$-\dot{I}_2^* = \frac{-\dot{U}_2^*}{R_L^* + jx_L^*} = \frac{1}{1.653 + j0.826} = 0.541\angle -26.55^o A$$

$$\dot{U}_1^* = -\dot{I}_2^*(r_k^* + jx_k^* + R_L^* + jx_L^*)$$
$$= 0.541\angle -26.55^o(0.0132 + j0.0478 + 1.653 + j0.826)$$
$$= 1.018\angle 1.12^o V$$

$$\dot{I}_0^* = \frac{\dot{U}_1^*}{r_m^* + jx_m^*} = \frac{1.018\angle 1.12^o}{2.22 + j20} = 0.051\angle -82.55^o$$

$$\dot{I}_1^* = -\dot{I}_2^* + \dot{I}_0^* = 0.541\angle -26.55^o + 0.051\angle -82.55^o = 0.571\angle -30.77^o$$

2-5



解：（1） $\boldsymbol{Z_{1b} = Z_{1N} = \frac{U_{1N}^2}{S_{1N}} = \frac{2200^2}{10000} = 484\Omega}$

$$Z_{2b} = Z_{1N} = \frac{U_{2N}^2}{S_{2N}} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega$$

$$\dot{I}_0 * = 0.05, \dot{U}_1 * = 1$$

$$r_m = \frac{P_{Fe}}{I_0^2} = \frac{P_{Fe}}{(0.05 I_{1N})^2} = \frac{P_{Fe}}{(0.05 \frac{S_N}{U_{1N}})^2} = 1355.2\Omega$$

$$Z_m * = \frac{\dot{U}_1 *}{\dot{I}_0 *} = \frac{1}{0.05} = 20$$

$$r_m * = \frac{r_m}{Z_{1b}} = \frac{1355.2}{484} = 2.8$$

$$x_m * = \sqrt{Z_m *^2 - r_m *^2} = \sqrt{20^2 - 2.8^2} = 19.8$$

$$r_1 * = \frac{r_1}{Z_{1b}} = \frac{3.6}{484} = 0.00744$$

$$r_2 * = \frac{r_2}{Z_{2b}} = \frac{0.036}{4.84} = 0.00744$$

$$x_k * = \frac{x_k}{Z_{1b}} = \frac{26}{484} = 0.05372$$

$$x_1 * = x_2 * = 0.5 x_k * = 0.5 \times 0.05372 = 0.0269$$

（2）设二次电 $\boldsymbol{\dot{U}_{2*} = 1\angle 0^0}$**，则** $\boldsymbol{\dot{I}_{2*} = 1\angle -36.87^0}$

2-6

(1) 变比

$$\mathbf{k}=\frac{\mathbf{10}}{\mathbf{1}/\sqrt{\mathbf{3}}}=\mathbf{17.32}$$

(2) 通过变比求二次侧相电压，根据欧姆定律分别求二次侧各相电流，通过 KCL 求中性线电流，通过变比求一次侧相电流（注意电流方向）。

1）二次侧各相电流

$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{a'a}}=\mathbf{15.56}\angle\mathbf{135}^{\circ}\mathbf{A};\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{b'b}}=\mathbf{22}\angle\mathbf{23.12}^{\circ}\mathbf{A};\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{c'c}}=\mathbf{44}\angle-\mathbf{113.1}^{\circ}\mathbf{A};$

2）二次侧中性线电流 $\dot{\mathbf{I}}_{\infty'}=\mathbf{22.33}\angle-\mathbf{111.25}^{\circ}\mathbf{A}$

3）一次侧相电流 $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{AB}}=\mathbf{0.898}\angle-\mathbf{45}^{\circ}\mathbf{A}$

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{CA}}=\mathbf{2.54}\angle\mathbf{66.9}^{\circ}\mathbf{A}$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{BC}}=\mathbf{1.27}\angle-\mathbf{156.9}^{\circ}\ \mathbf{A}$$

4）一次侧三相电流不对称，根据 KCL 计算一次侧线电流：

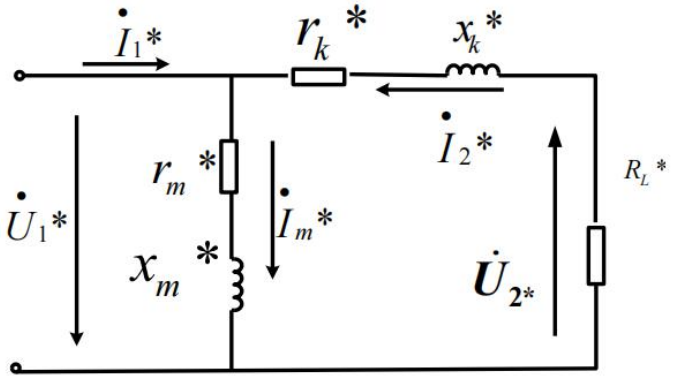
$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{A}}=\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{AB}}-\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{CA}}=\mathbf{2.99}\angle-\mathbf{96.94}^{\circ}\mathbf{A};$

$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{B}}=\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{BC}}-\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{AB}}=\mathbf{1.808}\angle\mathbf{175.65}^{\circ}\mathbf{A};$

$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{c}}\ =\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{CA}}-\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{BC}}=\mathbf{3.566}\angle\mathbf{52.65}^{\circ}\mathbf{A}$。

(3) $\mathbf{P_1}=\mathbf{P_2}=\mathbf{12100W},\mathbf{Q_1}=\mathbf{Q_2}=\mathbf{13100var}$

2-8



(1) 高压侧(Y 连接) 额定线电压 6300V，额定线电流 29.3A
低压侧(d 连接) 额定线电压 400V，额定线电流 461.9A
空载试验时，

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{1.45 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 27.7}\right) = 85.7°$$

$$U_{2*} = \frac{400}{400} = 1, I_{2*} = \frac{27.7}{461.9} = 0.06$$

$$Z_{m*} = \frac{U_{2*}}{I_{2*}}\angle\theta = 16.6\angle 85.7 = 1.25 + 16.65i$$

短路试验时，

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{5.7 * 10^3}{\sqrt{3} * 284 * 29.3}\right) = 66.7°$$

$$U_{1*} = \frac{284}{6300} = 0.045，\ I_{1*} = 1$$

$$Z_{k*} = \frac{U_{1*}}{I_{1*}}\angle\theta = 0.045\angle 66.7 = 0.0178 + 0.0413i$$

(2) $\boldsymbol{r_* = \sqrt{1 - 0.0413^2} - 0.0178 = 0.98}$

将二次侧 d 型连接变成 Y 型连接，此时二次侧额定相电压,相电流分别为

$$\boldsymbol{U_{2N\Phi} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94\,V，\ I_{2N\Phi} = \frac{320000}{400 * \sqrt{3}} = 461.88\,A}$$

$$\boldsymbol{Z_b = \frac{U_{2N\Phi}}{I_{2N\Phi}} = 0.5}$$

$$\boldsymbol{r = r_* * Z_b = 0.49\Omega}$$

2-9

1）在一次侧进行计算有

$$I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{125\times10^6}{\sqrt{3}\times110\times10^3}=656(A)$$

$$Z_{1N}=\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{6300^2}{125\times10^6}=96.8(\Omega)$$

$I_0=0.02I_{1N}=0.02\times656=13.1$ (A)

$$r_m=\frac{p_0}{3I_0^2}=\frac{133\times10^3}{3\times13.1^2}=257.6(\Omega)$$

$$Z_m=\frac{U_{1N}}{\sqrt{3}I_0}=\frac{110\times10^3}{\sqrt{3}\times13.1}=4841(\Omega)$$

$$x_m=\sqrt{Z_m^2-r_m^2}=\sqrt{4841^2-257.6^2}=4834\,(\Omega)$$

∵ $r_{k^*}=\frac{p_{kN}}{S_N}=\frac{600\times10^3}{125\times10^6}=0.0048$

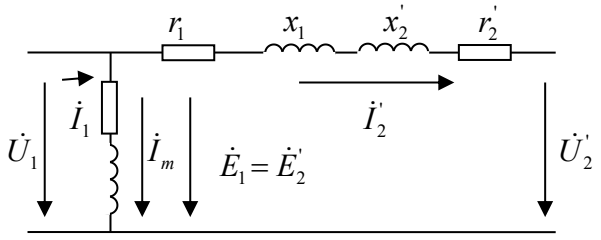
$$Z_{k^*}=U_{k^*}=0.105$$

$$x_{k^*}=\sqrt{Z_{k^*}^2-r_{k^*}^2}=\sqrt{0.105^2+0.0048^2}=0.1049\,(\Omega)$$

∴ $r_k=r_{k^*}Z_{1N}=0.0048\times96.8=0.465(\Omega)$

$$x_k=x_{k^*}Z_{1N}=0.1049\times96.8=10.15(\Omega)$$

$$Z_k=Z_{k^*}Z_{1N}=0.105\times96.8=10.2(\Omega)$$



近似等效电路

（2） 根据上述近似等效电路，以 U_2’为参考相量，则有：

$$k=\frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}=\frac{110}{\sqrt{3}\times11}=5.77$$

$$\dot{U}_2'=kU_{2N}\angle0^\circ=5.77\times11\times10^3\angle0^\circ=63.5\times10^3\angle0^\circ$$

$$\dot{I}_2^{'}=\frac{\dot{I}_{2N}}{\sqrt{3}k}=\frac{S_N}{\sqrt{3}\times\sqrt{3}U_{2N}k}\angle-36.9^\circ=\frac{125\times10^6}{3\times11\times10^3\times5.77}\angle-36.9^\circ=656\angle-36.9^\circ$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_1&=\dot{U}_2^{'}+\dot{I}_2^{'}Z_k=63.5\times10^3\angle0^\circ+656\angle-36.9^\circ\times(0.465+j10.15)\\&=67937\angle4.3^\circ\end{aligned}$$

$$\dot{I}_m=\frac{\dot{U}_1}{Z_m}=\frac{67937\angle4.3^\circ}{257.6+j4834}=14.0\angle-82.6^\circ$$

$$\dot{I}_1=\dot{I}_m+\dot{I}_2^{'}=14.0\angle-82.6^\circ+656\angle-36.9^\circ=662.9\angle-37.7^\circ$$

（3）在一次侧加额定电压、二次侧额定负载时，有：

$$\dot{U}_{1N}=\dot{U}_2^{'}+\dot{I}_{2N}^{'}Z_k=U_2^{'}\angle0^\circ+656\angle-36.9^\circ\times(0.465+j10.15)=(U_2^{'}+4242)^2+5142^2$$

根据模相等可得：$(\frac{110\times10^3}{\sqrt{3}})^2=(U_2^{'}+4242)^2+5142^2$

解得：$U_2^{'}=59.0\times10^3(V)$

$$U_2=\frac{U_2^{'}}{k}=\frac{59.0\times10^3}{5.77}=10225$$

根据定义：$\Delta U=\frac{U_{2N}-U_2}{U_{2N}}=\frac{11\times10^3-10225}{11\times10^3}\times100\%=7.0\%$

根据实用公式：$$\begin{aligned}\Delta U&=(r_{k*}\cos\theta_2+x_{k*}\sin\theta_2)\times100\%\\&=(0.0048\times0.8+0.1049\times0.6)\times100\%=6.68\%\end{aligned}$$

根据（2）的结果有：

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times100\%=\frac{U_2I_2\cos\theta_2}{U_1I_1\cos\theta_1}=\frac{11\times656/\sqrt{3}\times0.8}{67937\times662.9\times\cos(-42)}\times100\%=99.6\%$$

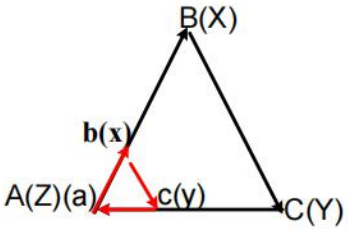
根据实用公式：$$\begin{aligned}\eta&=\frac{\beta S_N\cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2+\beta^2p_{kN}+p_0}\times100\%\\&=\frac{1\times125\times10^6\times0.8}{1\times125\times10^6\times0.8+600\times10^3+133\times10^3}\times100\%=99.3\%\end{aligned}$$

（4）当 $\beta=\sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}=\sqrt{\frac{133}{600}}=0.47$ 时：

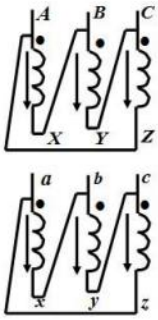
$$\begin{aligned}\eta_{\max}&=\frac{\beta S_N\cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2+\beta^2p_{kN}+p_0}\times100\%\\&=\frac{0.47\times125\times10^6\times0.8}{0.47\times125\times10^6\times0.8+0.47^2\times600\times10^3+133\times10^3}\times100\%=99.3\%\end{aligned}$$

第3章　三相变压器及运行

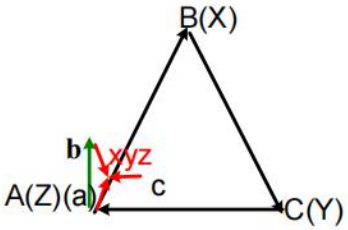
p54：3-1



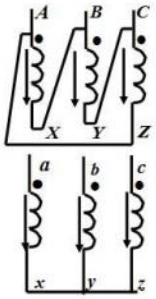
Dd0

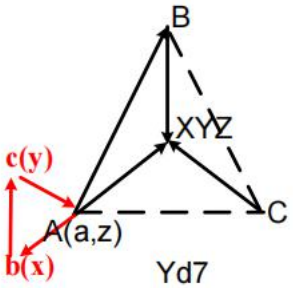


Dy11

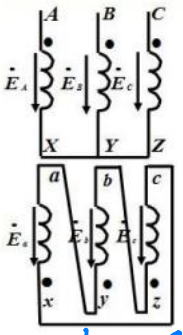


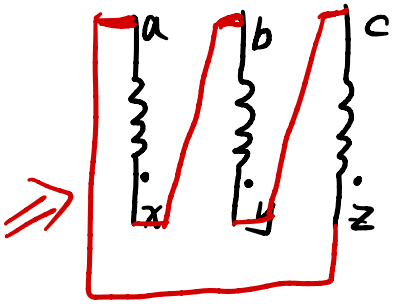
Dy11





Yd7



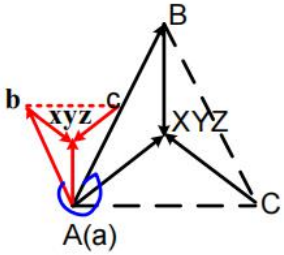


答案给的有点问题，相量图很明显

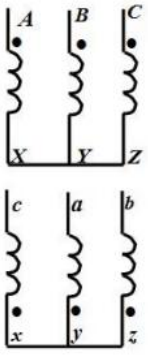
$\overrightarrow{ax} = \overrightarrow{ab}$

x点应该和b点连起

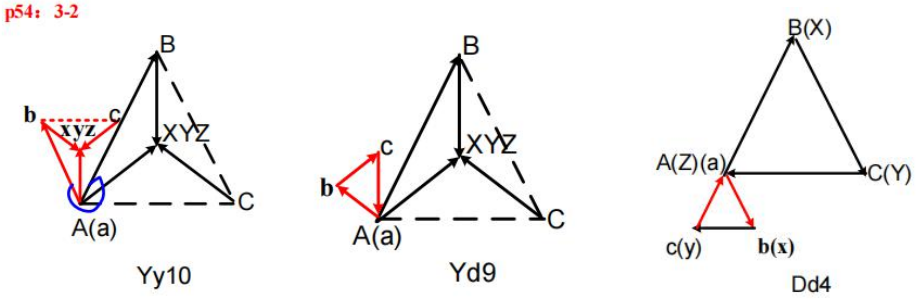
Yy10



Yy10



p54：3-2



3-3、设有两台变压器并联运行，变压器 I 的容量为 1000kVA，变压器 II 的容量为 500kVA，在不容许任何一台变压器过载的条件下，试就下列两种情况求该变压器组可能供给的最大负载。

（1）当变压器 I 的短路电压为变压器 II 的短路电压的 90%时，即设 $U_{kI^*}=0.9U_{kII^*}$

（2）当变压器 II 的短路电压为变压器 I 的短路电压的 90%时，即设 $U_{kII^*}=0.9U_{kI^*}$

解：（1）由题目知变压器 I 先满载，即 $\beta_I=1$

$$\beta_1:\beta_2=\frac{1}{U_{kI^*}}:\frac{1}{U_{kII^*}}=1:0.9 \qquad \therefore \quad \beta_{II}=0.9$$

$$S_{总}=\beta_1 S_{1N}+\beta_2 S_{2N}=1\times1000+0.9\times500=1450(kVA)$$

（2）由题目知变压器 II 先满载，即 $\beta_{II}=1$

$$\beta_1:\beta_2=\frac{1}{U_{kI^*}}:\frac{1}{U_{kII^*}}=0.9:1 \qquad \therefore \quad \beta_I=0.9$$

$$S_{总}=\beta_1 S_{1N}+\beta_2 S_{2N}=0.9\times1000+1\times500=1400(kVA)$$

3-4、设有两台变压器并联运行，其数据如表 3-1

表 3-1　两台变压器的数据

变压器	I	II
容量	500kVA	1000kVA
U1N	6300V	6300V
U2N	400V	400V
在高压侧测得的 短路试验数据	250V 32A	300V 82A
连接组	Yd11	Yd11

（1）该两变压器的短路电压 U_k 各为多少？

（2）当该变压器并联运行，供给总负载为 1200kVA，问每台变压器供给多少负载？

（3）当负载增加时哪一台变压器先满载？设任一台变压器都不容许过载，问该两台变压器并联运行所能供给的最大负载是多少？

（4） 设负载功率因数为 1，当总负载为 1200kW，求每台变压器二次绕组的电流？

解：（1）变压器 I：$I_{1N}=\dfrac{S_{NI}}{\sqrt{3}U_{1N}}=\dfrac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times6300}=45.8(A)$

$$Z_{kI}=\frac{U_{kI}}{\sqrt{3}I_{kI}}=\frac{250}{\sqrt{3}\times32}=4.5(A)$$

$$U_{kI^*}=Z_{kI^*}=\frac{Z_{kI}}{Z_{1NI}}=\frac{\sqrt{3}Z_{kI}I_{1NI}}{U_{1NI}}=\frac{\sqrt{3}\times4.5\times45.8}{6300}=0.057$$

同理可求得变压器 II：$U_{kII^*}=Z_{kII^*}=\dfrac{Z_{kII}}{Z_{1NII}}=\dfrac{\sqrt{3}Z_{kI}I_{1NII}}{U_{1NII}}=0.053$

∴ 变压器 I 短路电压 $U_{kI}=U_{kI^*}\times U_{1N}/\sqrt{3}=0.057\times6300/\sqrt{3}=207.3(V)$

变压器 II 短路电压 $U_{kII}=U_{kII^*}\times U_{1N}/\sqrt{3}=0.053\times6300/\sqrt{3}=192.8(V)$

(2) 由已知可得，$\begin{cases}\beta_1:\beta_2=\dfrac{1}{U_{kI^*}}:\dfrac{1}{U_{kII^*}}=\dfrac{1}{0.057}:\dfrac{1}{0.053}\\ S_{总}=\beta_1S_{NI}+\beta_2S_{NII}=500\beta_1+1000\beta_2=1200\end{cases}$

解得： 0.76 $\beta_2=0.82$

∴ $S_{1I}=\beta_{1I}S_{NI}=0.76\times500=380$（kVA）

$S_{1I}=\beta_{1I}S_{NII}=0.82\times1000=820$（kVA）

（3）$U_{kI^*}>U_{kII^*}$ ∴ 变压器 II 先满载

设$\beta_2=1$，则由上式可得$\beta_1=0.93$

$$S_{\max}=\beta_1S_{NI}+\beta_2S_{NII}=0.93\times500+1\times1000=1465(kVA)$$

（4）由已知得：$I_{2总}=\dfrac{P_{2总}}{3U_{2N}\cos\theta_2}=\dfrac{1200\times10^3}{3\times400\times1}=1000(A)$（相电流）

$$\begin{cases} I_{2总} = I_{2I} + I_{2II} = 1000 \\ I_{2I} : I_{2II} = S_I : S_{II} = \dfrac{S_{NI}}{U_{kI*}} : \dfrac{S_{NII}}{U_{kII*}} = \dfrac{500}{0.057} : \dfrac{1000}{0.053} = 0.465 \end{cases}$$

解得：I_{2I}=320(A)　　I_{2II}=680(A)

(上式求出为二次侧的相电流，也可以求其线电流)